基于GCM的蒙古高原降水稳定同位素模拟

陆文静[1,2]， 瞿德业[1,2]， 杨明月[1,2]， 黄翰林[1,2]， 杨山泉[1,2]
（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：利用第二次稳定水同位素比较小组SWING2中的5种大气环流模式（GCM）对比分析蒙古高原降水同位素大气水线方程、时空变化特征及与温度的关系，并与全球降水同位素观测信息网（GNIP）实测数据进行比较，旨在根据比较结果得出最佳适用于蒙古高原的GCM模型，为缺少实测站点的蒙古高原地区提供详细的降水同位素信息。结果表明：由LMDZ（ECMWF）模拟的当地大气水线方程$\delta D=7.783\delta^{18}O+3.011$更接近于实测结果；5种GCM模式模拟的$\delta^{18}O$与δD都具有显著的季节性变化，其中模拟月均$\delta^{18}O$和δD值效果最好的为LMDZ（free）和LMDZ（ECMWF）；根据纬度效应分析发现，只有CAM2（free）、LMDZ（ECMWF）和MIROC（free）模型能够显示出蒙古高原的纬度效应；从经度上看，LMDZ（ECMWF）和isoGSM（NCEP）模型显示出西段地区（87°~107°E）降水中的$\delta^{18}O$值比东段地区（107°~127°E）降水中的$\delta^{18}O$值大；在温度效应分析中，除了LMDZ（free）呈现出较弱的温度效应，其余模式均呈现出明显的温度效应，并且LMDZ（ECMWF）模式模拟两地降水中的$\delta^{18}O$与温度的相关系数最高，温度效应最强。

关键词：GCM；降水；同位素；蒙古高原

大气降水是水循环的重要组成部分，降水中稳定同位素作为研究水循环的天然示踪剂，对环境变化十分敏感，可以用于研究复杂的水文和气候过程[1-2]。自1950s开始，国际原子能机构和世界气象组织联合建立的全球降水同位素监测网络（Global Network of Isotopes in Precipitation，GNIP）持续追踪全球降水中氢氧稳定同位素及气象要素[3-5]，为研究降水同位素提供基础数据及重要参考。Araguás等[6]根据GNIP数据库以及区域气候的现有信息，讨论了东南亚和西太平洋地区降水稳定同位素组成的空间和时间变异性；Hatvani等[7]选取GNIP中24个监测站探索伊比利亚半岛降水同位素的组成及空间变化；Prasad等[8]根据GNIP的数据分析了印度四个城市（即新德里、海得拉巴、西隆和卡利卡特）的降水稳定同位素；郭鑫等[9]通过分析降水样品数据与周边GNIP站点数据相结合，发现内蒙古局地大气降水中δD和$\delta^{18}O$值存在自西向东不断偏负的趋势，且与张掖等西北干旱区相比内蒙古区域大气降水线的斜率与截距偏高。随着GNIP中国观测点的相继停止，全国范围内时间序列连续的降水同位素资料也相当匮乏。中国生态系统研究网络（Chinese Ecosystem Research Network，CERN）和各个野外台站为了解决我国大气降水同位素观测的不足，在2004年成立了“中国大气降水同位素观测网络”（Chinese Network Isotopes in Precipitation，CHNIP）。目前有许多学者通过CHNIP数据对中国干旱半干旱地区进行研究：王圣杰等[10]根据2012—2013年新疆天山地区降水同位素监测网络数据发现降水中的δD和$\delta^{18}O$呈南高北低和夏高冬低的趋势，并且天山南坡和北坡降水同位素差异与不同的水汽传输路径有关；Liu等[11]基于2005—2010年西北地区降水同位素监测网络数据发现$\delta^{18}O$的时间变化主要表现为反向“V”形模式。但由于成本及自然环境等因素，尤其在干旱区，监测覆盖更为有限，且监测时间并不连续，这在一定程度上制约了对相关地区和时间段的降水稳定同位素的研究[12-13]。

大气环流模式（General Circulation Model，GCM）能够精确模拟全球及区域的大气动力学和

收稿日期：2024-03-13； **修订日期**：2024-04-30
基金项目：西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目（NWNW-LKQN2020-05XX）资助
作者简介：陆文静（2000-），女，硕士研究生，主要从事水文同位素研究. E-mail: lwj002277@163.com
通讯作者：瞿德业. E-mail: qudeye@nwnu.edu.cn

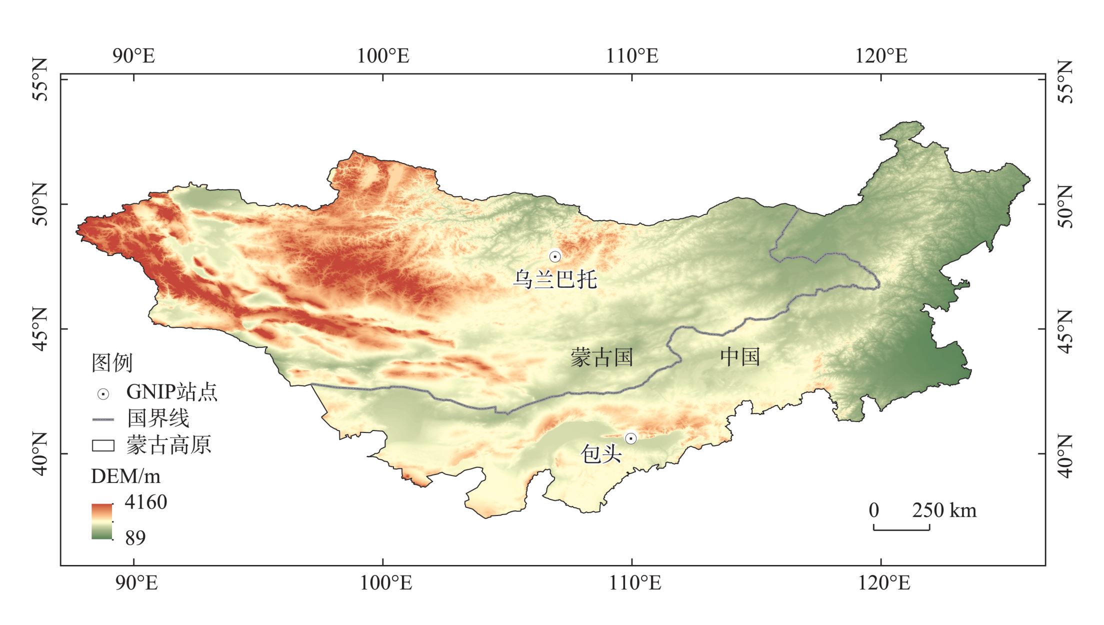
热力学特征，同时其过程包含详细完整的水文循环[14]。进行水稳定同位素的GCM模拟可以解决实测数据缺乏等问题并能够重建水汽和降水中同位素时空变化[15-16]。降水稳定同位素的GCM模拟，即在大气环流模型基础上加入水汽同位素分馏的计算模块，通过将水稳定同位素的分馏规律引入GCM水循环的各个环节，计算大气网格点的基本质量、动量、能量和水平衡方程，并对积云对流等关键气象过程进行科学的参数化设置，从而精确地模拟出降水中稳定同位素的含量[17]。目前，已有多种iGCMs(isotopic General Circulation Models)模拟降水中水稳定同位素，但不同模式模拟精度存在较大差异。为量化评估iGCMs的模拟效果，国际上成立了水稳定同位素的比较计划(Stable Water Isotope Intercomparison Group，SWING)和第二水稳定同位素比较计划(Stable Water Isotope Intercomparison Group，Phase2，SWING2)[18-20]。在该计划的第一阶段包含了汉堡大学的GCM模式ECHAM4、NASA/GISS的GCM模式GISS-E和墨尔本大学的GCM模式MUGCM[21-22]。而在第二阶段，有更多iGCMs参与到对比方案中，更利于比较不同iGCMs模式模拟的结果与实测同位素之间的异同及多元化，并由此展开了一系列研究。石梦雨等[23]利用3种GCM模型模拟新疆乌鲁木齐降水同位素数据，确定该区域大气水汽稳定同位素的基本特征；杨森等[24]基于SWING2模式，分析1979—2007年中国各地区的大气降水稳定同位素特征，讨论冰芯等气候代用指标(如冰芯)的氧同位素在全球增温背景下的变化特征；Shi等[25]利用SWING2模式模拟降水稳定同位素的结果，探讨控制一般环流模式模拟青藏高原地区降水同位素的季节性周期能力的因素。

蒙古高原是东亚内陆高原，包含干旱与半干旱地区，春秋两季对中国北部及华北的风沙源区构成了极大的威胁，生态脆弱，水资源时空分布不均且亏缺严重，是全球增温速度最迅速的区域之一，该区域的干湿状况在一定程度上被降水的波动所影响，对该地区降水稳定同位素进行研究非常重要[26-27]。目前，大部分学者仅分析该地区夏季的时间段，且实测站点较少。因此，利用5种GCM模式模拟蒙古高原1980—2007年降水同位素值，并与GNIP站点降水稳定同位素值进行对比分析，旨在筛选适用于蒙古高原的GCM模式，为缺少实测站点和时间序列的蒙古高原地区提供详细的降水同位素信息，为研究该地水文循环过程和水资源的合理利用提供一定的理论基础。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

蒙古高原处于东亚的干旱半干旱地区，地理位置介于88°43′~126°04′E，37°24′~53°23′N，其主体包括中国内蒙古自治区和蒙古国(图1)。蒙古高原平



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2021)5447号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

均海拔1580 m，北部和西部为山地，中部和东部为开阔的丘陵，西南部为戈壁沙漠，地势西高东低[28]。蒙古高原属温带大陆性气候，盛行西北风。年平均气温在-26~17 ℃之间，而大部分地区的年平均降水量低于200 mm（东部、北部和东北部除外，可能达到400 mm以上）[29]。

1.2 数据来源

全球降水同位素监测网络（GNIP）可以反映出全球范围内降水同位素的变化规律（https://nucleus.iaea.org/wiser）。本文选取研究区中GNIP站点的降水同位素数据，包括乌兰巴托（106°59′E，47°56′N，海拔1338 m）、包头市（109°51′E，40°40′N，海拔1067 m）（表1）。

表1　蒙古高原GNIP站点降水同位素基本数据

Tab. 1　Basic precipitation isotope data from GNIP sites in the Mongolian Plateau

GNIP站点	时期	$\delta^{18}O$记录数/个	δD记录数/个	$\delta^{18}O$/‰	δD/‰
乌兰巴托	1990—2001年	44	44	-14.10	-108.82
包头	1986—1992年	61	60	-8.27	-57.10

大气环流模式（GCM）可以对水汽和降水稳定同位素的时空变化进行大尺度的模拟。本文选取SWING2中的5种GCM模式模拟数据（http://www.giss.nasa.gov/swing2），包括CAM2（free）、LMDZ（free）、LMDZ（ECMWF）、isoGSM（NCEP）和MIROC（free）（表2）。本文气象数据来源于国家气象数据网提供的1980—2007年包头市气象站点数据及美国国家气候中心（http://www.ngdc.noaa.gov/index.html）提供的1980—2007年乌兰巴托市气象站点的温度数据。

表2　同位素GCM模型的基本信息

Tab. 2　Basic information of stable isotope-equipped of GCM used in the study

GCM模式	模式来源	空间分辨率	模拟方法
CAM2（free）	美国国家大气研究中心	2.81°×2.81°	AMIP标准
LMDZ（free）	法国气象动力实验室	3.75°×2.54°	AMIP标准
LMDZ（ECMWF）	法国气象动力实验室	3.75°×2.54°	ECMWF张弛逼近
isoGSM（NCEP）	日本东京大学	1.88°×1.90°	NCEP张弛逼近
MIROC（free）	日本东京气候系统研究中心	2.81°×2.79°	AMIP标准

1.3 数据处理方法

降水中氢氧同位素比率为$H_2^{18}O/H_2O$和HDO/H_2O的大小以相对于维也纳标准平均海水（Vienna Standard Mean Ocean Water）的千分形式表示，其计算公式如下：

$$\delta^{18}O=\left(\frac{H_2^{18}O/H_2O}{R}-1\right)\times1000‰ \quad (1)$$

$$\delta D=\left(\frac{HDO/H_2O}{R}-1\right)\times1000‰ \quad (2)$$

式中：R为$^{18}O/^{16}O$和D/H的比率，CAM2（free）与LMDZ模式中$^{18}O/^{16}O$和D/H分别取0.0020052和0.00015573，MIROC（free）和isoGSM（NCEP）模式中R取值为1。

利用加权平均计算$\delta^{18}O$和δD，公式如下：

$$\delta_{(w)}=\frac{\sum P_i\delta_i}{\sum P_i} \quad (3)$$

式中：$\delta_{(w)}$为$\delta^{18}O$和δD加权平均后的值（‰），P_i为降水量（mm），δ_i为降水中$\delta^{18}O$和δD的值（‰）。

2　结果与分析

2.1 蒙古高原的大气水线方程

大气水线（LMWL）描述了水体中稳定氢、氧同位素值的相关性[21]。LMWL的斜率表示的δD和$\delta^{18}O$的分馏速率的对比关系，截距表示的是δD对平衡状态的偏离程度[30]。本文通过GNIP实测数据与GCM中5种模拟数据分别构建了蒙古高原地区大气水线方程LMWL（图2），5种GCM模式模拟LMWL的相关系数R^2均在0.99以上，表现出较好的相关性。LMDZ（free）、isoGSM（NCEP）模拟的LMWL斜率为7.527和7.618，均小于GNIP站点的LMWL斜率7.823，但其中LMDZ（free）模拟的LMWL截距0.645小于实测结果1.516，而isoGSM（NCEP）模拟的LMWL截距7.227却远大于1.516的实测结果。虽然MIROC模拟的LMWL相关系数R^2为0.999，但不如LMDZ（ECMWF）模拟的LMWL斜率与截距更接近实测值。CAM2（free）模拟的LMWL斜率与截距高达8.088和12.324，均大于Craig等[31]提出的大气水线方程GMWL（$\delta D=8\delta^{18}O+10$）与实测值构建LMWL的斜率与截距，根据研究结果显示，降水过程中的蒸发强弱与LMWL的斜率大小密切相关，低斜率表示蒸发过程较为强烈[32]。这可能是由于CAM2（free）模型低估了蒙古高原降水中的蒸发。而实测

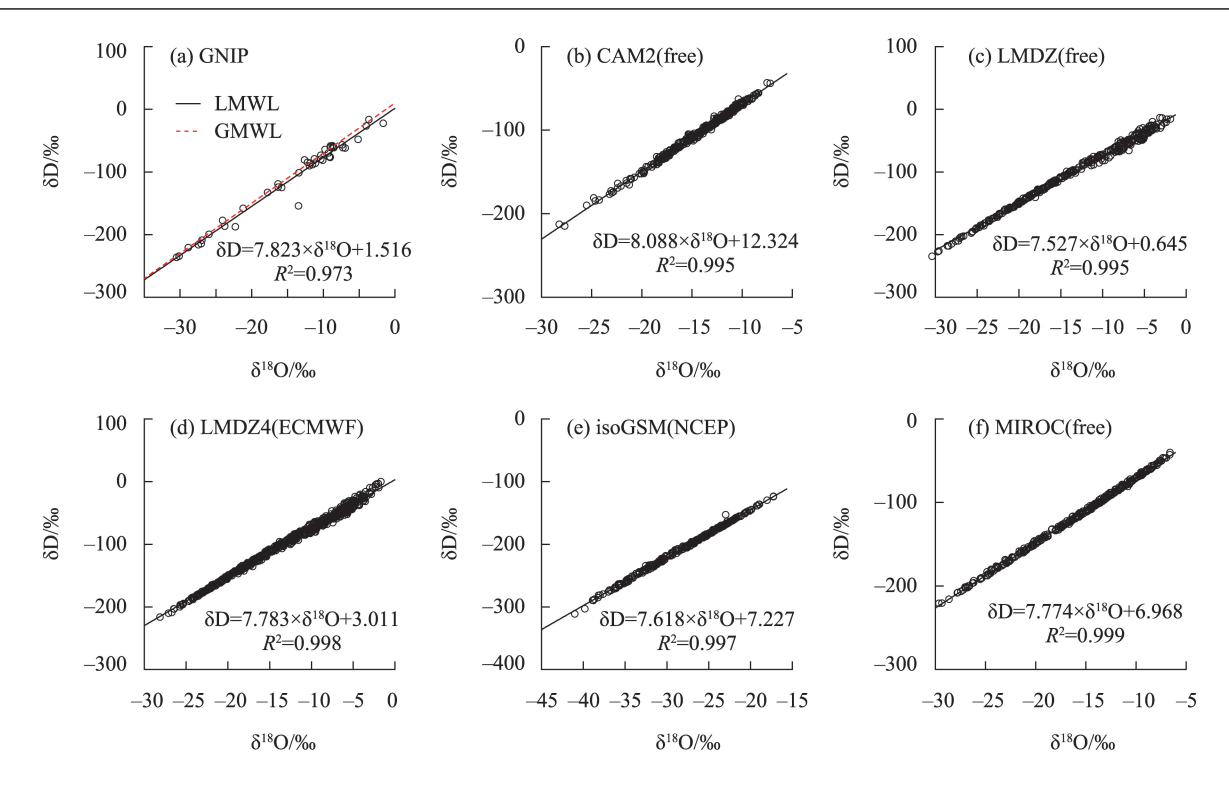


图2 基于GCM的蒙古高原降水中δ18O和δD之间的关系

Fig. 2 Relationship between δ18O and δD in precipitation based on GCM of the Mongolian Plateau

值及大部分GCM模型模拟的LMWL比GMWL的斜率和截距较小，这是因为蒙古高原处于西风环流核心区，而西风环流引起的大气降水的水汽来源于北大西洋等区域，具体表现为湿度低、二次蒸发作用明显[33]，因此导致大气水线的斜率和截距较小。而在5种GCM模型中，只有CAM2(free)的同位素平衡参数化是可变平衡运行(根据降水率和温度进行平衡)，由于蒙古高原是一个相对干燥的地区，降水量较少且分布不均，使得CAM2(free)中基于湿润环境假设的同位素平衡参数化不再适用[34]。比较而言，由LMDZ(ECMWF)模拟的LMWL更接近于实测值。

2.2 蒙古高原δ18O和δD时间变化的比较

本研究将38°~54°N和87°~127°E范围内的网格进行计算，根据研究区降水和气温的季节变化，将暖半年定义为4—9月，冷半年定义为10月—次年3月。各模式对降水稳定同位素的模拟结果均显示，暖半年温度较高的月份明显高于冷半年温度较低月份的模拟值，与GNIP的δ18O和δD值呈现出夏高冬低的变化特征一致(图3，图4)。具体而言，GCM模拟的δ18O和δD波动趋势基本为先升后降，总体来看都表现出很明显的季节变化。GCM模拟降水中δ18O值在−41.01‰~−1.07‰之间，其中LMDZ(ECMWF)模拟的5月为最高值，isoGSM(NCEP)模拟的1月为最低值。GCM模拟降水中δD值在−311.38‰~−3.93‰，LMDZ(free)模拟的5月为最高值，isoGSM(NCEP)模拟的1月亦为最低值(表3)。然而，5种GCM模型模拟月变化趋势与GNIP实测月变化趋势有一定差异，例如，与GNIP的δ18O和δD在1—2月呈现下降趋势相比，五种GCM模型在1—2月都呈现上升趋势。GNIP的δ18O和δD最低值出现在12月，而对于GCM模拟δ18O的月变化中，只有LMDZ(ECMWF)和MIROC(free)模拟的δ18O和δD的最低值出现在12月。这可能是由于：(1) 模型将复杂的大气过程用参数化表示，有一定的不完整性；(2) GNIP数据在时间上不连续，空间覆盖范围小，且对于干旱地区，尤其冬季降水较少，因此冬季实测降水同位素数据并不完整，而GCM模型模拟的数据相对完整且连续，因此在冬季月变化趋势有一定差异。

利用GNIP站点实测值与5个模式在对应网格模拟的月均δ18O和δD值，计算其之间的相关系数、均方根误差以及标准差，对GCM模式进行客观评估模拟效果，绘制出泰勒图(图5)。只有LMDZ(free)和LMDZ(ECMWF)模式模拟δ18O值与实测值相关系

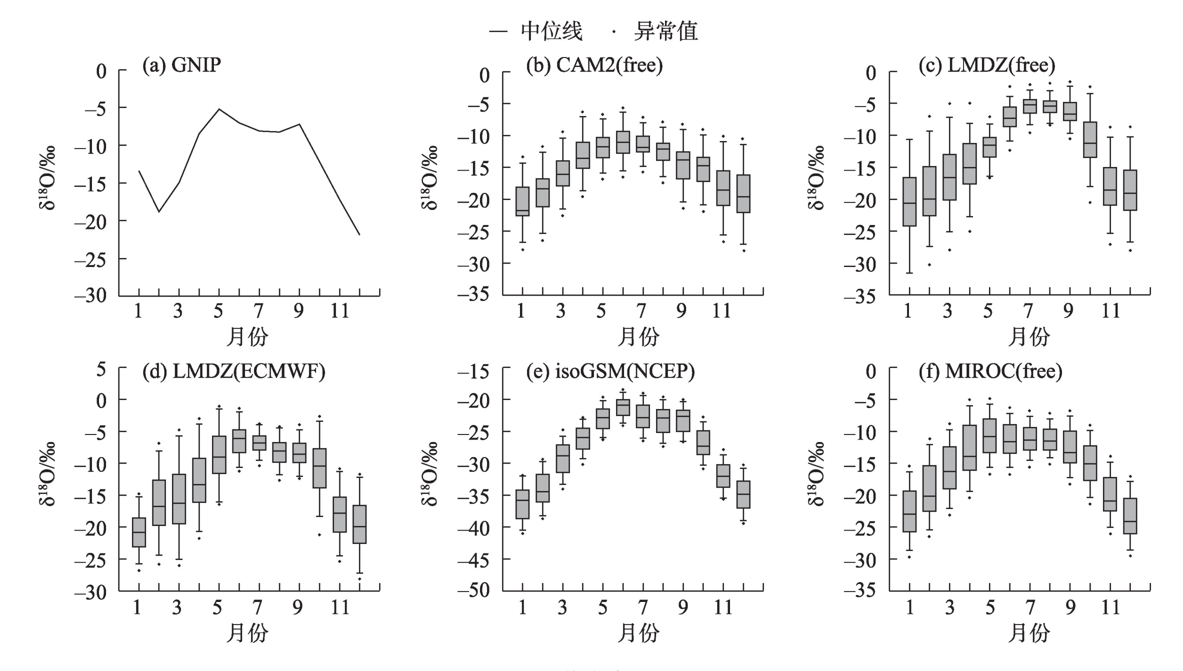


图3 基于GCM的蒙古高原δ18O的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of δ18O based on GCM in the Mongolian Plateau

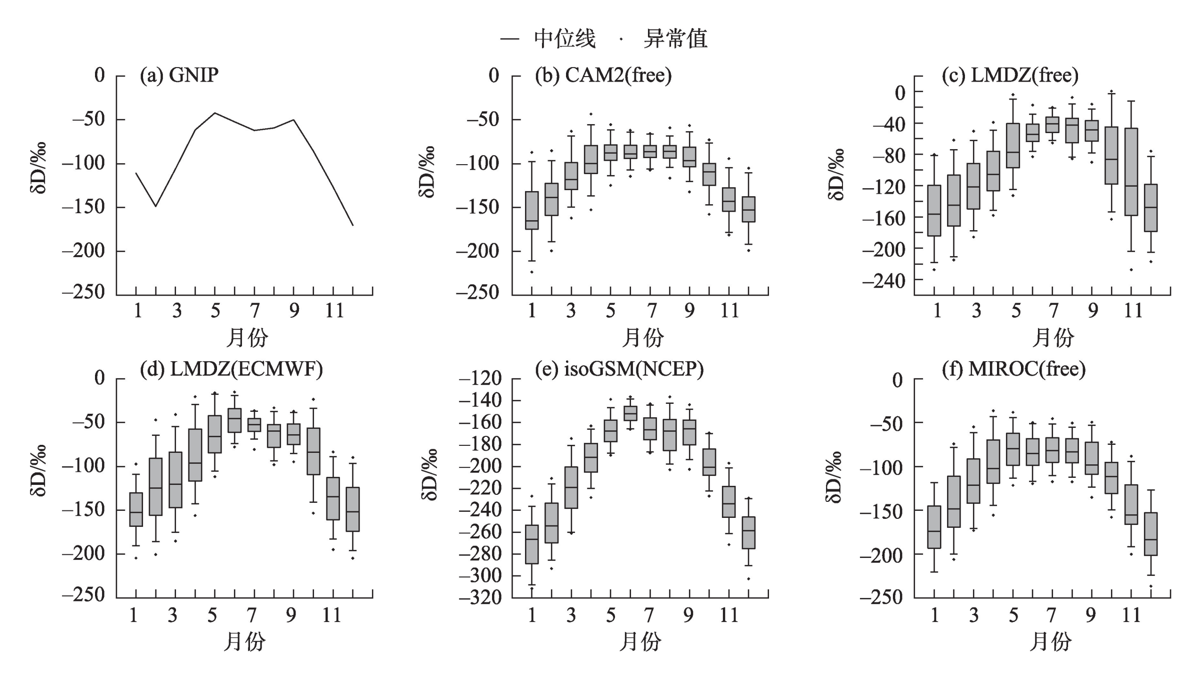


图4 基于GCM的蒙古高原δD的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of δD based on GCM in the Mongolian Plateau

表3 GNIP实测和GCM模拟蒙古高原δ18O和δD的数据特征

Tab. 3 Characteristics of δ18O and δD data from GNIP measurements and GCM simulations in the Mongolian Plateau

	δ18O/‰				δD/‰			
	最小值	月份	最大值	月份	最小值	月份	最大值	月份
GNIP	−21.90	12月	−5.22	5月	−170.13	12月	−42.15	5月
CAM2(free)	−28.23	12月	−5.69	6月	−223.56	1月	−43.43	4月
LMDZ(free)	−32.57	1月	−1.61	9月	−277.40	1月	−3.93	5月
LMDZ(ECMWF)	−28.11	12月	−1.07	5月	−204.71	12月	−15.19	6月
isoGSM(NCEP)	−41.01	1月	−18.47	6月	−311.38	1月	−136.46	6月
MIROC(free)	−29.57	12月	−5.02	5月	−236.56	12月	−36.50	4月

数均在0.8以上，RMSE均小于1，且与实测值的标准差之比位于0.75~1.25（图5a）。除CAM2(free)和isoGSM(NCEP)外，其余模式模拟δD值与实测值相关系数均在0.8以上，RMSE均小于1，其中只有LMDZ(free)和LMDZ(ECMWF)模拟值与实测值的标准差之比位于0.75~1.25（图5b）。综合比较结果，GCM模式均能够模拟出蒙古高原$\delta^{18}O$和δD的季节变化特征，其中模拟月均$\delta^{18}O$和δD值效果最好的为LMDZ(free)和LMDZ(ECMWF)。

2.3 蒙古高原$\delta^{18}O$空间变化的比较

为体现$\delta^{18}O$空间差异，可将研究区域按纬度分别划分成高纬度地区（46°~54°N，即北段）和低纬度地区（38°~46°N，即南段）；按经度可分为西段（87°~107°E）和东段（107°~127°E）。

降水中的稳定同位素值随着纬度的增加而逐渐变小的现象被称为纬度效应。虽然纬度效应受地形和复杂的降水过程等因素的影响，但在较大的纬度范围内仍然显著[35-36]。同时，Wang等[37]研究发现，西段地区$\delta^{18}O$比例比东段地区$\delta^{18}O$比例大；郭鑫等[9]研究发现蒙古高原的内蒙古地区出现$\delta^{18}O$自西向东不断偏负的趋势。

从图6可知，只有CAM2(free)、LMDZ(ECMWF)和MIROC(free)模型能够显示出纬度效应。5种GCM模式模拟的$\delta^{18}O$相较于夏季，冬季$\delta^{18}O$差异值均较大。

从图7可知，LMDZ(ECMWF)和isoGSM(NCEP)模型显示出西段（87°~107°E）降水中的$\delta^{18}O$值比东段地区降水中的$\delta^{18}O$值大，这两种GCM模型模拟$\delta^{18}O$空间变化与之前实测研究结果一致。与冬季月份相比，夏季月份两个经度区间的差异相对较小。在大多数GCM模拟降水中的$\delta^{18}O$可以观察到西段$\delta^{18}O$值与东段$\delta^{18}O$值在7月非常接近。

2.4 蒙古高原$\delta^{18}O$与温度相关性变化的比较

降水同位素与当地地表温度之间的联系是大气降水稳定同位素研究的核心问题。大气中的稳定同位素比率与温度成正比，则被称作"温度效应"[38]。章新平等[16]研究表明，东亚地区的中高纬度和内陆地区的温度效应尤为明显，但并无降水量效应。因此本研究通过$\delta^{18}O$与温度相关性变化判断各模式的模拟效果。总体来看，除了LMDZ(free)呈现出较弱的温度效应，其余模式均呈现出了明显的温度效应（图8）。具体而言，CAM2(free)在蒙古高原西南部少数地区的相关系数为0.4~0.6，多数西南部地区相关系数均在0.6~0.8，其余地区均在0.8~1（图8a）。LMDZ(free)在整个蒙古高原的相关系数特征表现为北部与东部在0.8~1，其余地区相关系数均小于0.8，其中少数南部地区相关系数在0~0.2（图8b）。LMDZ(ECMWF)模拟的$\delta^{18}O$与温度之间的相关系数除少数地区相关系数在0.6~0.8，其余地区均在0.8~1.0（图8c）。MIROC(free)也表现出相似的相关系数特征，整个蒙古高原的相关系数都集中在0.8~1.0（图8e）。isoGSM(NCEP)在整个蒙古高原的相关系数特征表现为南部少数地区在0.4~0.6，多数地区在0.6~0.8，其余地区均在0.8 ~ 1（图8d）。

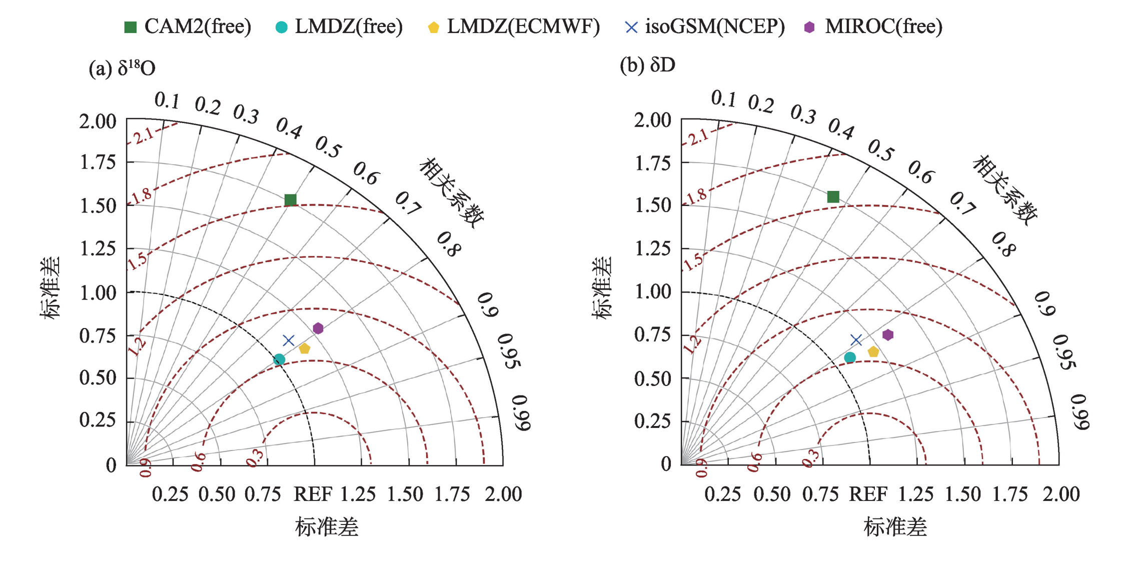


图5 GCM模式模拟月均$\delta^{18}O$和δD相对于GNIP实测值的泰勒图

Fig. 5 Taylor diagram of simulated monthly mean $\delta^{18}O$ and δD of the GCM model relative to measured GNIP values

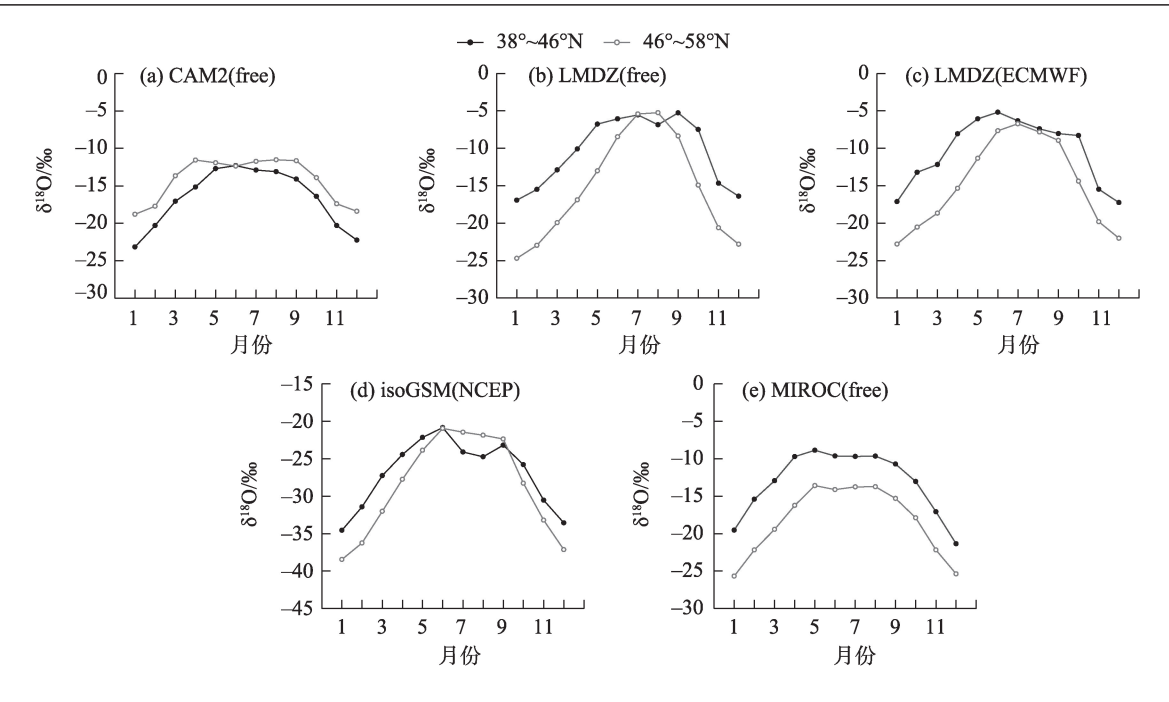


图6 基于GCM的蒙古高原不同纬度平均$\delta^{18}O$的月变化

Fig. 6 Monthly variation of mean $\delta^{18}O$ at different latitudes in the Mongolian Plateau based on GCM

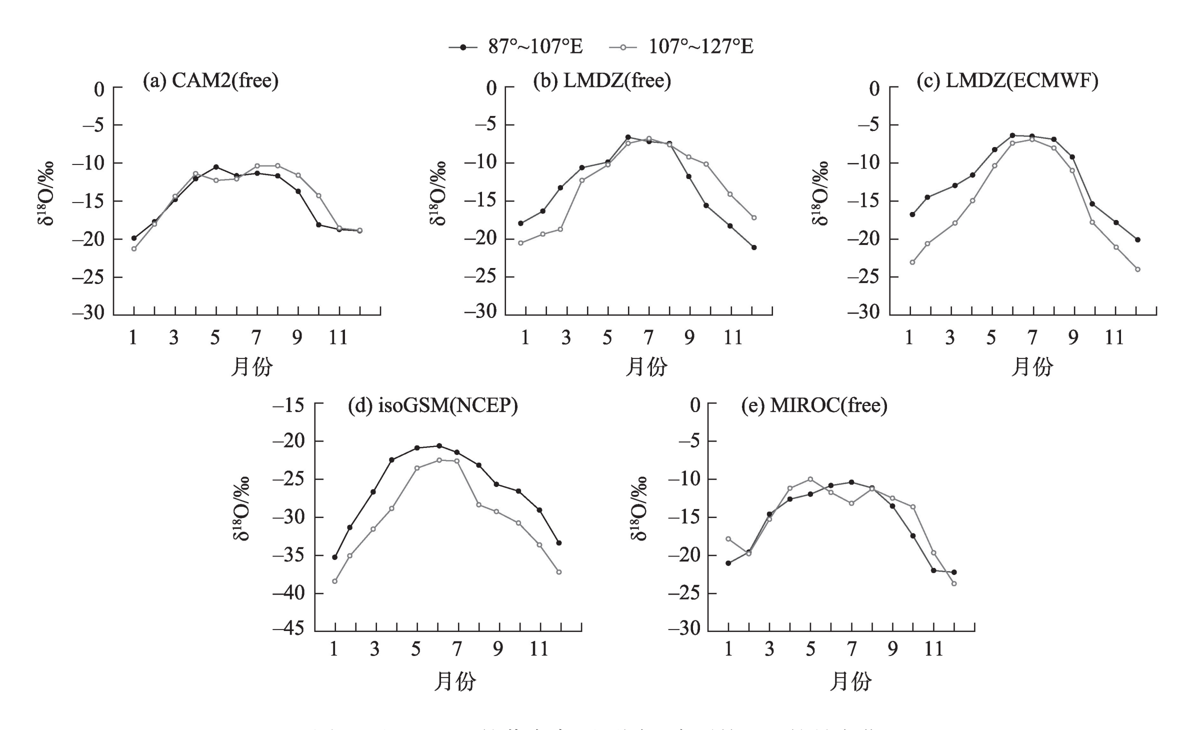


图7 基于GCM的蒙古高原不同经度平均$\delta^{18}O$的月变化

Fig. 7 Monthly variation of mean $\delta^{18}O$ at different longitudes in the Mongolian Plateau based on GCM

为了进一步探究GCM模型分别在GNIP两个站点的模拟效果,通过回归分析,得到了GNIP实测和GCM模拟的乌兰巴托、包头降水中$\delta^{18}O$与温度回归方程及相关系数(表4)。CAM2(free)、LMDZ(free)、LMDZ(ECMWF)、isoGSM(NCEP)、MIROC(free)模拟乌兰巴托的$\delta^{18}O$与温度的相关系数分别为0.88、0.91、0.93、0.92、0.90,均大于乌兰巴托实测值与温度得到的相关系数0.79。CAM2(free)、LMDZ(free)、LMDZ(ECMWF)、isoGSM(NCEP)、MIROC(free)模拟包头的$\delta^{18}O$与温度的相关系数分别为0.69、0.75、0.87、0.86、0.77,均大于包头实测值与温度得到的相关系数0.61。GCM模型模拟乌兰巴托和包头降水

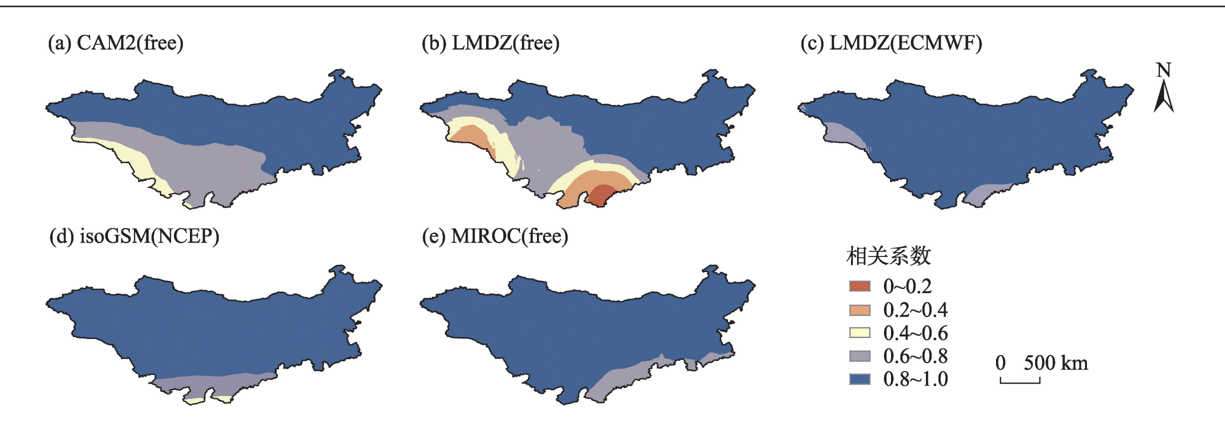


图8 GCM模式模拟蒙古高原δ18O与温度之间的相关性

Fig. 8 Correlation between δ18O and temperature in the Mongolian Plateau simulated by the GCM model

表4 GNIP实测和GCM模拟的乌兰巴托、包头降水中δ18O与温度的线性关系

Tab. 4 Linear relationship between δ18O and temperature in Ulaanbaatar and Baotou precipitation measured by GNIP and simulated by GCM

	乌兰巴托		包头	
	温度效应	R	温度效应	R
GNIP	$\delta^{18}O=0.45T-15.89$	0.79	$\delta^{18}O=0.39T-11.44$	0.61
CAM2(free)	$\delta^{18}O=0.29T-16.50$	0.88	$\delta^{18}O=0.23T-16.36$	0.69
LMDZ(free)	$\delta^{18}O=0.47T-14.94$	0.91	$\delta^{18}O=0.23T-10.69$	0.75
LMDZ(ECMWF)	$\delta^{18}O=0.44T-14.56$	0.93	$\delta^{18}O=0.38T-10.98$	0.87
isoGSM(NCEP)	$\delta^{18}O=0.43T-28.38$	0.92	$\delta^{18}O=0.34T-29.92$	0.86
MIROC(free)	$\delta^{18}O=0.33T-16.97$	0.90	$\delta^{18}O=0.33T-16.40$	0.77

中的δ18O与温度都呈正相关且相关系数较高。

在两个GNIP站点实测降水中的δ18O与温度相关系数对比发现(表4),包头降水中的δ18O与温度的相关系数比乌兰巴托低,各GCM模式模拟包头降水中的δ18O与温度的相关系数同样比模拟乌兰巴托降水中的δ18O与温度的相关系数低,这表明低纬度地区(包头)δ18O值对气温变化的响应较弱,高纬度地区(乌兰巴托)δ18O值对气温变化的响应较强,这与图8呈现出温度效应规律一致。其中,LMDZ(ECMWF)模式模拟两地降水中的δ18O与温度的相关系数最高,温度效应最强。

3 讨论

本文选取了5种大气环流模式,虽然它们模拟结果总体上是相似的,但它们之间的模拟结果与实测结果在细节上仍存在差异,可能是由于以下原因产生差异:(1)根据表2可知,5种GCM的空间分辨率不同,虽然LMDZ(ECMWF)的空间分辨率最低,但其模拟效果最好,可能是由于其使用ECMWF(欧洲中期天气预报中心)张弛逼近方法能够重新推动风场和温度场,迫使模拟接近实际气象,因此其在各方面模拟效果都比较突出,而同样空间分辨率小的LMDZ(free)仅仅是通过海表面温度驱动自动运行[39],而isoGSM(NCEP)的空间分辨率最高,但其使用NCEP(美国国家环境预测中心)张弛逼近方法可能不适用于蒙古高原。(2) GCM是格点模式,所得到的数值模拟结果只能反映网格区的平均状况,难以准确反映数值模拟中的细节问题[40]。(3)模式的所有动力过程都是通过参数化进行模拟,例如在参数化过程中,5种模型都使用了相同的平衡分馏系数,其对于凝结和凝华过程都做出相似的假设;而对于动力分馏的参数化过程,当前仅通过冰面过饱和度这一因素来表征,冰面过饱和度是随温度变化而变化[41],但实际自然条件下有很多因素影响同位素的动力分馏,因此这种简化可能无法全面反映实际情况。

Wang等[37]利用SWING2模式(包括ECHAM、LMDZ、LMDZ(free)、MIROC和isoGSM)对中亚干旱区的模拟结果进行了比较,并指出ECHAM模式的模拟结果与观测结果最接近。周鑫等[42]利用LNDZ(free)、LMDZ(ECMWF)、GISS-E、isoGSM(NCEP)、MIROC(free)对黄土高原区的模拟结果进行综合比较,得出LMDZ(free)模式在黄土高原区模拟效果最好。但在本研究中,综合考察蒙古高原大气水线的模拟结果、降水稳定同位素的时空变化模拟、降水稳定同位素温度效应模拟,LMDZ(ECMWF)的模拟效果最好,因此,不同的大气环流模式适用于不同的研究区域。然而,由于GCM模型的复杂性和各种

不确定性因素的存在,模拟结果往往与实际观测数据存在一定的偏差,因此采用偏差订正GCM模拟的数据有重要意义。Peng等[43]采用六种GCM模型和两种偏差订正方法(线性缩放方法和分布平移方法)的平均值建立中国东部地区降水氧等温线;Xiao等[44]利用isoGSM2模拟数据和中国黄土高原典型河谷12个地点的观测同位素数据展示了海拔高度对降水同位素误差的影响,并根据高度误差与同位素模拟的线性关系,对模拟的同位素组成进行了修正。在未来可根据两个方向进一步研究同位素变化:(1)采用不同的偏差订正方法与GCM模拟数据相结合,选出最适合的偏差方法及GCM模型进行研究。(2)探讨某一因素(模拟得到的海拔高度、温度、降水量及模拟过程参数等)对GCM模拟数据误差的影响,并利用偏差订正方法校正影响因素来提高GCM模式模拟同位素数据的准确性。如更能准确模拟出研究区域的大气降水稳定同位素信息,为当地的水循环过程及可持续发展提供依据。

4 结 论

本文选取了1980—2007蒙古高原的GNIP实测值和5种GCM模式模拟数据,对比数据分析该地区降水稳定同位素的大气水线方程、时空特征变化及$\delta^{18}O$与温度的关系,得出如下结论:

(1)在5种GCM模式模拟大气水线方程中,CAM2(free)模拟LMWL的斜率与截距均大于实测值的LMWL,分别为8.088和12.324;在5种GCM模式模拟$\delta^{18}O$和δD相关性对比中,MIROC模拟的R^2最高,为0.999;LMDZ(ECMWF)模拟的LMWL更接近实测结果的LMWL。

(2)5种GCM模型对$\delta^{18}O$与δD的模拟均呈现出明显的季节性变化特征。$\delta^{18}O$的最高值出现在LMDZ(ECMWF)模拟的5月,δD的最高值出现在LMDZ(free)模拟的5月,$\delta^{18}O$和δD最低值均出现在isoGSM(NCEP)模拟的1月。综合泰勒图呈现的结果,模拟月均$\delta^{18}O$和δD值效果最好的为LMDZ(free)和LMDZ(ECMWF)。

(3)根据纬度效应分析发现,只有CAM2(free)、LMDZ(ECMWF)和MIROC(free)模型能够显示出纬度效应,5种GCM模式模拟的$\delta^{18}O$相较于夏季,冬季$\delta^{18}O$差异值均较大。从经度上看,LMDZ(ECMWF)和isoGSM(NCEP)模型显示出西段地区(87°~107°E)降水中的$\delta^{18}O$值比东段地区(107°~127°E)降水中的$\delta^{18}O$值大,且在大多数GCM模拟降水中的$\delta^{18}O$可以观察到西段$\delta^{18}O$值与东段$\delta^{18}O$值在7月份非常接近。

(4)5种GCM模式均模拟出了蒙古高原$\delta^{18}O$与温度之间的正相关系数并体现纬度越高,温度效应越强这一规律,除了LMDZ(free)呈现出较弱的温度效应,其余模式均呈现出了明显的温度效应。进一步对乌兰巴托、包头降水中$\delta^{18}O$的实测值和模拟值分别与温度的相关系数分析中发现,GCM模型模拟乌兰巴托和包头降水中的$\delta^{18}O$与温度都呈正相关且相关系数较高,其中,LMDZ(ECMWF)模式模拟两地降水中的$\delta^{18}O$与温度的相关系数最高,温度效应最强。

参考文献(References):

[1] 周思捷, 孙从建, 陈伟, 等. 黄土高原东部夏半年降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1745-1761. [Zhou Sijie, Sun Congjie, Chen Wei, et al. Precipitation isotope characteristics and water vapor sourcesin summer in eastern Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 77(7): 1745-1761.]

[2] 折远洋, 王圣杰, 王鹏, 等. 西秦岭地区大气降水氢氧稳定同位素特征[J]. 地球与环境, 2023, 51(2): 143-152. [She Yuanyang, Wang Shengjie, Wang Peng, et al. Stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the western Qinling Mountains[J]. Earth and Environment, 2023, 51(2): 143-152.]

[3] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 等. 基于GNIP的黄土高原区大气降水同位素特征研究[J]. 水文, 2018, 38(1): 58-66. [He Qiang, Sun Congjian, Wu Lina, et al. Study on isotopic characteristics of atmospheric precipitation in Loess Plateau based on GNIP[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 58-66.]

[4] 赵伟, 郝成元. 中国大陆夏季水汽稳定同位素空间特征[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 54-59. [Zhao Wei, Hao Chengyuan. Spatial characteristics of stable isotope in summer precipitation in China mainland[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(1): 54-59.]

[5] Antunes P, Boutt D F, Rodrigues F C. Orographic distillation and spatio-temporal variations of stable isotopes in precipitation in the North Atlantic[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(5): 775-793.

[6] Araguás L A, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D22): 28721-28742.

[7] Hatvani I G, Erdélyi D, Vreča P, et al. Analysis of the spatial distribution of stable oxygen and hydrogen isotopes in precipitation across the Iberian Peninsula[J]. Water, 2020, 12(2): 481.

[8] Prasad G, Chinnasamy P, Cartwright I. Role of stable isotopes in revealing moisture sources and rainfall variability in India[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2024, 106(48): 101444.

[9] 郭鑫, 李文宝, 杜蕾, 等. 内蒙古夏季大气降水同位素特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1088-1096. [Guo Xin, Li Wenbao, Du Lei, et al. Characteristics and influence factors for the hydrogen and oxygen isotopic of precipitation in Inner Mongolia[J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1088-1096.]

[10] 王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 1119-1130. [Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1119-1130.]

[11] Liu J, Song X, Yuan G, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2014, 66(1): 22567.

[12] 陈举藩, 陈粉丽, 武茜茜, 等. 基于LMDZ模型的蒙古高原降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 地理科学, 2022, 42(9): 1654-1664. [Chen Jufan, Chen Fenli, Wu Xixi, et al. Hydrogen and oxygen stable isotope characteristics and water vapor sources of precipitation over Mongolian Plateau based on LMDZ model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(9): 1654-1664.]

[13] 曾帝, 吴锦奎, 李洪源, 等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 857-869. [Zeng Di, Wu Jinkui, Li Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: A review[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 857-869.

[14] Zhang M, Wang S. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 921-938.

[15] Resmi T R, Sudharma K V, Hameed A S. Stable isotope characteristics of precipitation of Pamba River basin, Kerala, India[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(7): 1481-1493.

[16] 章新平, 孙治安, 张新主, 等. 东亚降水中δ^{18}O的GCM模拟及其与GNIP实测值的比较[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 67-80. [Zhang Xinping, Sun Zhi'an, Zhang Xinzhu, et al. Intercomparison of δ^{18}O in precipitation simulated by isotopic GCMS With GNIP observations over East Asia[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(1): 67-80.]

[17] 王学界, 章新平, 张婉君, 等. 全球降水中氢氧稳定同位素GCM模拟空间分布的比较[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 983-995. [Wang Xuejie, Zhang Xinping, Zhang Wanjun, et al. Comparison on spatial distribution of hydrogen and oxygen stable isotope GCM simulation in global precipitation[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(9): 983-995.]

[18] 廖亚一, 谢冰波, 赵盼盼. 基于打分法评估GCM模式模拟降水的性能[J]. 水利规划与设计, 2023(5): 24-33, 101. [Liao Yayi, Xie Bingbo, Zhao Panpan. Evaluation of the performance of the GCM model for simulating precipitation based on a scoring approach[J]. Water Planning and Design, 2023(5): 24-33, 101.]

[19] 李昕潼, 李占玲, 韩孺村. 不同偏差校正法对GCM降水数据的应用效果分析[J]. 水文, 2023, 43(3): 93-100, 117. [Li Xintong, Li Zhanling, Han Rucun. Evaluations of different bias correction methods on the GCM precipitation data[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(3): 93-100, 117.]

[20] 李宁, 白蕤, 李玮, 等. 基于格网的GCM数据修订分析未来海南岛农业水热资源的变化特征[J]. 中国农业气象, 2021, 42(6): 447-462. [Li Ning, Bai Rui, Li Wei, et al. Analysis of the change of agricultural heat and precipitation resources based on grid revision of GCM outputs in Hainan island[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(6): 447-462.]

[21] 章新平, 孙治安, 关华德, 等. 东亚水循环中水稳定同位素的GCM模拟和相互比较[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1274-1285. [Zhang Xinping, Sun Zhi'an, Guan Huade, et al. GCM simulation of stable water isotopes in water cycle and intercomparisons over East Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1274-1285.]

[22] 潘素敏, 张明军, 王圣杰, 等. 基于GCM的中国土壤水中δ^{18}O的分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1727-1738. [Pan Sumin, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Distribution characteristics of δ^{18}O in soil water in China based on GCMs[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(6): 1727-1738.]

[23] 石梦雨, 王圣杰, 姚俊强, 等. 基于GCM的乌鲁木齐水汽稳定同位素变化特征及其与ENSO的关系[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 895-904. [Shi Mengyu, Wang Shengjie, Yao Junqiang, et al. Variation of stable isotope in water vapor over Urumqi and its relationship with ENSO based on isotope enabled-GCMs[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 895-904.]

[24] 杨森, 张明军, 王圣杰. 基于GCM和冰芯的天山地区降水同位素的水汽来源影响机制[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 425-435. [Yang Sen, Zhang Mingjun, Wang Shengjie. Affecting mechanism of moisture sources of isotopes in precipitation in the Tianshan Mountains Based on GCMs and ice core[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 425-435.]

[25] Shi X Y, Risi C, Li L, et al. What controls the skill of general circulation models to simulate the seasonal cycle in water isotopic composition in the Tibetan Plateau region?[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(22): e2022JD037048.

[26] 孙慧, 萨楚拉, 孟凡浩, 等. 2000—2020年蒙古高原积雪覆盖率时空变化及其影响因素分析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2022, 38(11): 1-6. [Sun Hui, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Spatial and temporal variations of snow cover on the Mongolian Plateau and its influencing factors, 2000-2020[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2022, 38(11): 1-6.]

[27] 张港栋, 包刚, 元志辉, 等. 2001—2020年蒙古高原昼夜非对称变暖对植被返青期的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 700-710. [Zhang Gangdong, Bao Gang, Yuan Zhihui, et al. Effects of asymmetric warming of daytime and nighttime on the start of grow-

ing season on the Mongolian Plateau from 2001 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 700-710.]

[28] 张艳珍, 王钊齐, 杨悦, 等. 蒙古高原草地退化程度时空分布定量研究[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 233-243. [Zhang Yanzhen, Wang Zhaoqi, Yang Yue, et al. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 233-243.]

[29] Xin Y, Yang Y, Chen X, et al. One-kilometre monthly air temperature and precipitation product over the Mongolian Plateau for 1950-2020[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2023, 43(8): 3877-3891.

[30] 韦昊延, 陆彦玮, 李敏, 等. 中国西北内陆季风区基于不同时间尺度和回归方法的大气水线比较[J]. 应用生态学报, 2023, 34(3): 657-663. [Wei Haoyan, Lu Yanwei, Li Min, et al. Comparison of meteoric water lines at different temporal scales and regression methods in inland monsoon region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(3): 657-663.]

[31] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.

[32] Zhu G F, Li J F, Shi P J, et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation in different regions of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10): 876.

[33] 李文宝, 李畅游, 贾德彬, 等. 内蒙古中部夏季大气降水中同位素变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1214-1221. [Li Wenbao, Li Changyou, Jia Debin, et al. Change of stable isotopes in summer precipitation in central Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1214-1221.]

[34] Cappa C D, Hendricks M B, Depaolo D J, et al. Isotopic fractionation of water during evaporation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(16): 4525.

[35] Sangchul L, Carlington W, Ali S, et al. Impacts of global circulation model (GCM) bias and WXGEN on modeling hydrologic variables[J]. Water, 2018, 10(6): 764.

[36] Che Y, Zhang M, Wang S, et al. Stable water isotopes of precipitation in China simulated by SWING2 models[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(19): 732.

[37] Wang S J, Zhang M J, Chen F L, et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7): 13.

[38] Salamalikis V, Argiriou A A, Dotsika E. Periodicity analysis of delta O-18 in precipitation over Central Europe: Time-frequency considerations of the isotopic 'temperature' effect[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534(54): 150-163.

[39] Risi C, Noone D, Worden J, et al. Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopologues: 1. Comparison between models and observations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, 117(D5): 1-26.

[40] Fiorella R P, West J B, Bowen G J. Biased estimates of the isotope ratios of steady-state evaporation from the assumption of equilibrium between vapour and precipitation[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(19): 2576-2590.

[41] Risi C, Noone D, Worden J, et al. Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, 117(D5): 1-25.

[42] 周鑫, 陈粉丽, 刘雪媛, 等. 基于大气环流模式(GCM)的黄土高原区降水稳定同位素模拟分析比较[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1179-1186. [Zhou Xin, Chen Fenli, Liu Xueyuan, et al. Analysis and comparison of simulated stable isotopes of precipitation in the Loess Plateau based on GCMs[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1179-1186.]

[43] Peng P Y, Zhang X C J, Chen J. Bias correcting isotope-equipped GCMs outputs to build precipitation oxygen isoscape for eastern China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 589(58): 125153.

[44] Xiao Y, Yang G, Yoshimura K, et al. Altitude correction of GCM-Simulated precipitation isotopes in a valley topography of the Chinese Loess Plateau[J]. Sustainability, 2023, 15(17): 13126.

GCM-based stable isotope modelling of precipitation in the Mongolian Plateau

LU Wenjing[1,2], QU Deye[1,2], YANG Mingyue[1,2], HUANG Hanlin[1,2], YANG Shanquan[1,2]

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province,
Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study used five atmospheric circulation models (GCM) from SWING2 and the second stable water isotope comparison group, to analyze the atmospheric water line equations of precipitation isotopes, spatial and temporal variations, and temperature relationships in the Mongolian Plateau. They were compared with the data from the Global Network for Isotope Observation and Information on Precipitation (GNIP), to provide detailed precipitation isotope information for the Mongolian Plateau, which lacks measurement stations. The results show that the local atmospheric water equation $\delta D=7.783\delta^{18}O+3.011$ simulated by LMDZ (ECMWF) was closer to the measured values; the $\delta^{18}O$ and δD simulated by the five GCM models had significant seasonal variations, and the best simulation of their average monthly values were LMDZ (free) and LMDZ (ECMWF); and the results are based on the latitudinal effect. Only the CAM2 (free), LMDZ (ECMWF) and MIROC (free) models demonstrated the latitudinal effect in the Mongolian Plateau. In terms of longitude, the LMDZ (ECMWF) and isoGSM (NCEP) models showed that the $\delta^{18}O$ values during precipitation in the western section of the region (87°−107°E) were higher than those in the eastern section (107°−127°E). Except for LMDZ (free), which demonstrated a weak temperature effect, others showed a robust impact. The LMDZ (ECMWF) model simulated the highest correlation coefficient between $\delta^{18}O$ and temperature during precipitation in the two areas, with the strongest temperature effect.

Keywords: GCM; precipitation; isotopes; Mongolian Plateau